

[In: Johannes Kühl / Nora Löbe / Matthias Rang (eds) *Experiment Farbe. 200 Jahre Goethes Farbenlehre*. Katalog zur Ausstellung, Dornach (Schweiz), 11. Juni bis 31. August 2010. (Dornach: Verlag am Goetheanum, 2010), pp. 38–53].

## **Fuchs, Du hast das Gelb gestohlen**

### **Versuch über Goethes diebische Variation eines Experiments von Newton**

*Olaf L. Müller, Humboldt-Universität zu Berlin*

#### GLIEDERUNG

- I. Farbedetektiv Newton – Entdeckung des Vollspektrums
- II. Goethe protestiert und schiebt den Schirm nach vorn – Entdeckung des Kantendoppelspektrums
- III. Goethe schiebt den Schirm nach hinten – Entdeckung des Endspektrums
- IV. Störfaktor Auge?
- V. Nachts sind gelbe Katzen grau
- VI. Rettungsversuche für die Verdunkelungshypothese
- VII. Farbverschlingende Umgebungen
- VIII. Das Gelb taucht auf – verwirrende Effekte
- IX. Ausblick: Fragen über Fragen  
Literatur  
Abbildungen

ZUSAMMENFASSUNG. Newton fächert einen weißen Lichtstrahl durch prismatische Brechung (Refraktion) auf und entdeckt dadurch sein Vollspektrum, das die größte Farbenvielfalt zeigt und aus Lichtstrahlen unterschiedlicher Refrangibilität besteht (1672, 1704). Laut Newtons Theorie müsste sich die Farbvielfalt seines Vollspektrums steigern lassen, wenn man den Auffangschirm immer weiter vom brechenden Prisma entfernt; denn dadurch müssten zuvor noch vermischte Lichtbündel ähnlicher Farbe schließlich doch auseinanderstreben. Diese Prognose ist empirisch falsch, wie Goethe in seiner *Farbenlehre* (1810) herausstreicht: Das Endspektrum enthält weniger Farben, insbesondere fehlt dort das Gelb. Das ist eine Anomalie (à la Kuhn) der newtonischen Theorie. Wie lässt sich diese Anomalie erklären? Der Gelbverlust im Endspektrum muss irgendwas mit der Licht- und Farbempfindlichkeit des menschlichen Auges zu tun haben. Aber was? Der Bezold/Brücke-Effekt bietet offenbar keine befriedigende Erklärung des Phänomens, wie ich mit Matthias Rangs experimenteller Hilfe empirisch zeige. Ein zweiter Erklärungsansatz beruft sich auf die rot/grüne spektrale Umgebung, die das Gelb offenbar in den Hintergrund treten lässt. Die Farbwahrnehmung einer farbigen Figur hat ja immer auch mit der Umgebungsfarbe zu tun, wie z.B. beim Simultankontrast. Das zeigt sich im Experiment: Man kann das Gelb im Endspektrum zurückgewinnen, wenn man die anderen Farben des Spektrums abdeckt. Woran das wiederum liegt, ist bis heute ungeklärt. Es lässt sich jedenfalls nicht als Spezialfall des Simultankontrasts verstehen.

ANMERKUNG. Dieser elektronische Text wird hier nicht exakt in der Form wiedergegeben, in der er auf Papier erschienen ist; einige Fehler aus der Druckfassung sind hier beseitigt. Die Seitenzahlen der Papierfassung und der elektronischen Fassung sind identisch, eignen sich also zum Zitieren.

*lichtung  
manche meinen  
glün und gerb  
kann man nicht verwechsern.  
werch ein illtum!  
(Nach Ernst Jandl)*

## FUCHS, DU HAST DAS GELB GESTOHL

VERSUCH ÜBER GOETHES DIEBISCHE  
VARIATION EINES EXPERIMENTS VON  
NEWTON

### Zusammenfassung

Newton fächert einen weißen Lichtstrahl durch prismatische Brechung (Refraktion) auf und entdeckt dadurch sein Vollspektrum, das die größte Farbvielfalt zeigt und aus Lichtstrahlen unterschiedlicher Refrangibilität besteht (1672). Laut Newtons Theorie müsste sich die Farbvielfalt seines Vollspektrums steigern lassen, wenn man den Auffangschirm immer weiter vom brechenden Prisma entfernt; denn dadurch müssten zuvor noch vermischte Lichtbündel ähnlicher Farbe schließlich doch auseinanderstreben. Diese Prognose ist empirisch falsch, wie Goethe in seiner Farbenlehre (1810) herausstreicht:

Das Endspektrum enthält weniger Farben, insbesondere fehlt dort das Gelb. Das ist eine Anomalie (à la Kuhn) der newtonischen Theorie. Wie lässt sich diese Anomalie erklären? Der Gelbverlust im Endspektrum muss irgendetwas mit der Licht- und Farbempfindlichkeit des menschlichen Auges zu tun haben. Aber was? Der Bezold/Brücke-Effekt bietet offenbar keine befriedigende Erklärung des Phänomens, wie ich mit Matthias Rangs experimenteller Hilfe empirisch zeige. Ein zweiter Erklärungsansatz beruft sich auf die rot/grüne spektrale Umgebung, die das Gelb offenbar in den Hintergrund treten lässt. Die Farbwahrnehmung einer farbigen Figur hat ja immer auch mit der Umgebungsfarbe zu tun, wie zum Beispiel beim Simultankontrast. Das zeigt sich im Experiment: Man kann das Gelb im Endspektrum zurückgewinnen, wenn man die an-

deren Farben des Spektrums abdeckt. Woran das wiederum liegt, ist bis heute ungeklärt. Es lässt sich jedenfalls nicht als Spezialfall des Simultankontrasts verstehen.

### I. Farbendetektiv Newton – Entdeckung des Vollspektrums

An einem schönen Sonnentag verdunkelt Isaac Newton ein nach Süden gelegenes Zimmer, bohrt in den Fensterladen eine winzige kreisrunde Lochblende, bringt unmittelbar hinter dieser Blende ein Glasprisma an und fängt auf der gegenüberliegenden weißen Wand zweiundzwanzig Fuß hinter dem Prisma alles Licht auf, das von der sonnenbeschienenen Lochblende durchs Prisma gefallen ist und dabei (gemäß Brechungsgesetz) seine Richtung verändert hat (siehe Abb. 1).

Newton beobachtet zweierlei.<sup>1</sup> Der aufgefangene Lichtfleck ist nicht weiß, sondern regenbogenbunt, und nicht rund, sondern fünfmal so lang wie breit (siehe Abb. 2). Am einen Ende ist dieser Farbstreifen blau, am anderen

<sup>1</sup> Newton [1672]: 3075-3078.

### Abbildungsunterschriften

Allgemeine Anmerkung zu den Abbildungen. Die Fotografien, die wir in einigen Abbildungen wiedergeben, bieten keine farblich exakte Repräsentation dessen, was man im Experiment sieht. Sie illustrieren eher, als dass sie zum Beweis taugen. Daher empfehlen wir Ihnen, die Experimente selber in Augenschein zu nehmen.

Abb. 1. Newtons Weißanalyse (1672). Ein Sonnenstrahl wird durchs Fensterladenloch F in ein Prisma geschickt, wobei er vom geraden Weg abgelenkt wird und in seine kunterbunten Bestandteile zerlegt wird. [mh nach einer Schwarz/Weiß-Zeichnung aus Newtons Skizzenbuch; Newtons Originalgraphik ist abgedruckt in Lohne [IN]:126/7, „Figure 1“].

Abb. 2. Newtons Vollspektrum. Von links nach rechts sieht man Rot, Gelb, Grün, Türkis, Blau, mit fließenden Übergängen. [mr].

Abb. 3. Farbreichtum der Spektren bei wechselndem Abstand zwischen Prisma und Schirm. Die Tafel zeigt die Farbentwicklung nach prismatischer Brechung (in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Prisma und Schirm). Betrachten Sie zunächst die Position des Auffangschirms in der Mitte der jeweiligen Tafel, dort, wo Goethe ein gestricheltes Oval angedeutet hat. Dort liegt die Stelle, an der Newton das Vollspektrum aufgefangen hat, und dort zeigen sich besonders viele Farbnuancen. – Jetzt schauen Sie weiter unten auf die gestrichelte Linie näher am Prisma. Dort reißt eine weiße Lücke auf, die sich bei sinkendem Abstand immer stärker spreizt; die weiße Lücke ist unten und oben von farbigen Rändern bzw. Säumen eingerahmt. Zusammen mit der weißen Mitte bilden sie das Kantendoppelspektrum. – Bei wieder vergrößertem Projektionsabstand (ganz rechts im Bild) fängt man das Endspektrum auf. Es besteht aus nur drei Farben. [Die Abbildung geht auf Goethes fünfte Tafel zurück. Da die Farben der Goethe-Tafeln ausgebleicht sind, hat Matthias Herder die Tafel neu gezeichnet. Er hat sie zudem gedreht und gespiegelt, damit ihre Orientierung besser zu den anderen Abbildungen passt. Goethes Fassung der Tafel und deren Erklärung finden sich in Goethe [EzGF]:63ff].

Abb. 1

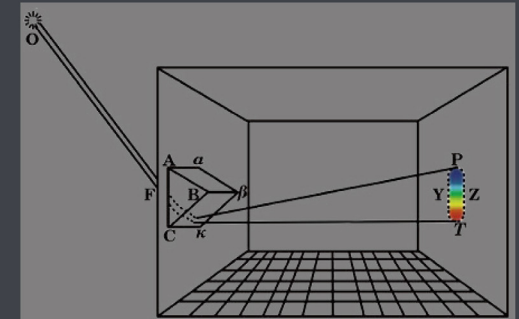
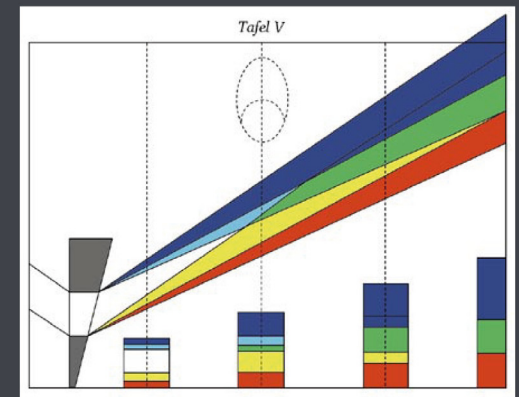


Abb. 2



Abb. 3



Ende rot; dazwischen türkis (cyanblau), grün und gelb. Natürlich sind die Übergänge zwischen allen diesen Farben fließend. Aber wer sich Newtons Spektrum in Ruhe anschaut, wird gerne zugeben, dass die genannten fünf Farben im Bild am stärksten zur Geltung kommen. Schematisch sieht dies Bild demzufolge so aus:



Durch sorgfältige Messung und Berechnung findet Newton heraus, dass die Breite des aufgefangenen Farbstreifens den Erwartungen entspricht, so wie sie sich aus den geometrischen Parametern der Situation (wie zum Beispiel aus der scheinbaren Größe der Sonnenscheibe am Himmel) berechnen lässt. Überraschend ist die Länge des Farbstreifens – und seine Farbigkeit. Wenn man sich den buntgefärbten Streifen in Newtons Dunkelkammer nun der Länge nach zusammensetzt denkt, und zwar als Nebeneinander aus einem blauen, einem türkisfarbenen, einem grünen, einem gelben und einem roten Farbfleck, dann drängt sich der Verdacht auf, dass verschiedenfarbige Lichtbündel das Prisma in leicht unterschiedlicher Richtung verlassen haben müssen. Das Prisma hat also das farblose Licht (das von der Sonne durch die Lochblende aufs Prisma gelangte) in verschiedenfarbige Lichtbündel zerlegt, indem es dessen blauen Anteil stärker vom Weg abgelenkt hat als den türkisfarbenen, den türkisfarbenen stärker als den grünen usw. Kurz, das weiße Licht der Sonne ist eine Mischung verschiedenfarbiger Lichtbündel, die auf dem Weg durchs Prisma verschieden stark gebrochen werden.

## II. Goethe protestiert und schiebt den Schirm nach vorn – Entdeckung des Kantendoppelspektrums

Was ich Ihnen eben erzählt habe, lernt jedes Kind in der Schule. Ein bahnbrechendes Experiment liefert theoretische Resultate wie in einem Indizienbeweis von Sherlock Holmes.

Johann Wolfgang Goethe glaubt dem britischen Farbendetektiv kein Wort. In seiner dreibändigen und tausendseitigen Farbenlehre aus dem Jahr 1810 greift Goethe die Theorie des Isaac Newton wütend an; experimentell, theoretisch, methodologisch, historisch.<sup>2</sup> Seine Kritik an Newton hat Licht- und Schattenseiten. Weder ist alles, was Goethe vorbringt, blanker Unsinn – noch liegt Goethe in allem richtig. Ich möchte Sie einladen, sich auf einen einzigen – winzigen – Strang aus der Newtonkritik Goethes einzulassen. Dieser Strang ist in den vergangenen zweihundert Jahren sporadisch immer wieder aufgegriffen worden, wurde meines Wissens aber bis heute nicht endgültig aufgeklärt. So wie meine sporadischen Vorläufer werde auch ich das Rätsel nicht lösen. Allenfalls werde ich mich an eine denkbare Lösung annähern.

Aber zur Sache! Um sicherzugehen, dass Newton ihn nicht mit Tricks hinters Licht geführt hat, wiederholt Goethe das newtonische Experiment mit wechselnden Parametern. Das wichtigste Ergebnis der experimentellen Exerzitien ist niederschmetternd. Newtons Farbspektrum ist ein extremer Sonderfall.<sup>3</sup> Die Farbenreihe

rot, gelb, grün, türkis, blau,

zeigt sich nur, wenn man den Abstand zwischen aufgefangenem Spektrum und Prisma sehr fein auf die Größe der Sonnenscheibe abstimmt.<sup>4</sup> Diese Verhältnisse und die newto-

<sup>2</sup> Siehe Goethe [1810b], [1810c], [1810e].

<sup>3</sup> *Die seit einem Jahrhundert herrschende Newtonische Theorie bingegen gründete sich auf einen beschränkten Fall und bevorzugte alle die übrigen Erscheinungen um ihre Rechte, in welche wir sie durch unsern Entwurf wieder einzusetzen getrachtet. Dieses war nötig, wenn wir die hypothetische Verzerrung so vieler herrlichen und erfreulichen Naturphänomene wieder ins Gleiche bringen wollten* [Goethe [1810a]: 7; meine Hervorhebung].

<sup>4</sup> Zudem darf der Radius des Fensterladenlochs nicht zu groß sein; er muss – noch ohne Prisma – ein scharfes Bild der Sonne erlauben, so wie in einer camera obscura. Newton und Goethe sind an dieser Stelle nicht sonderlich explizit.

Abb. 4

Abb. 4. Newtons Kantendoppelspektrum. An der linken Kante zeigen sich ein roter und ein gelber Saum, an der rechten Kante ein türkisfarbener und ein blauer Saum; zwischen diesen Säumen die weiße Mitte. [mr].



Abb. 5. Newtons Erklärung der weißen Mitte. Wer den Schirm an der mit MN bezeichneten Stelle placiert, fängt in der Mitte (zwischen T und  $\pi$ ) eine Zone auf, in der sich alle fünf gezeigten Lichtbündel  $P\pi$ ,  $Q\chi$ , ...  $T\tau$  überlagern und zu Weiß mischen. Am mit X bezeichneten Punkt (der bei größerem Projektionsabstand erreicht wird) verschwindet diese weiße Zone. [Newtons „figure 12“. Newtons Abbildungen sind den Opticks auf losen Blättern beigelegt; die Abbildung findet sich auf dem dritten Blatt zum zweiten Teil des Buchs I, das den Titel trägt: „Lib.I Par.II Tab.III“].

Abb. 5

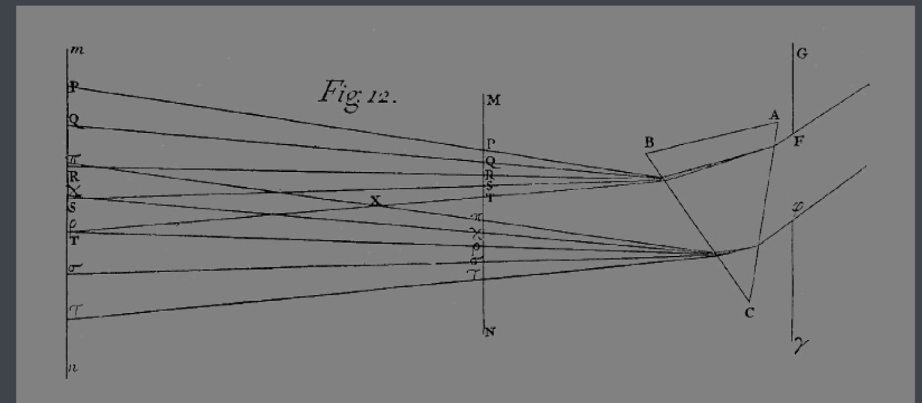
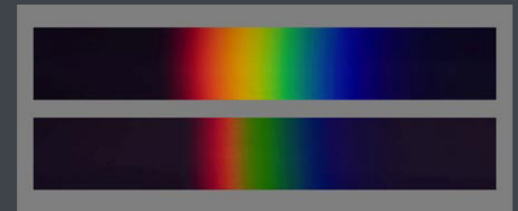


Abb. 6

Abb. 6. Newtons Voll- und Endspektrum im Vergleich. Durch die Gegenüberstellung der beiden Spektren springt der Gelbraub besonders deutlich ins Auge. Im Endspektrum unten sieht man von links nach rechts: Rot, Grün, Blau, mit wenigen Übergängen und Nuancen. Wo sind Gelb und Türkis geblieben, die oben im Vollspektrum deutlich zu sehen sind? [mr].





nischen Beobachtungen lassen sich aus dem Gleichgewicht bringen, wenn man einen Projektionsschirm nah ans Prisma heranrückt, um das Spektrum sozusagen am Ort des Geschehens aufzufangen (siehe Abb. 3). Dann fehlt plötzlich die grüne Mitte aus Newtons Farbspektrum; an deren Stelle sieht man eine farblose weiße Lücke, die auf der einen Seite an den gelben Teil aus Newtons Spektrum grenzt und auf der anderen Seite an dessen türkisfarbenen Teil:

rot, gelb, weiß, türkis, violett (Abb. 4).

Und diese weiße Lücke in der Mitte wird (im Verhältnis zum farbigen Teil des aufgefangenen Streifens) umso größer, je näher wir den Schirm zum Prisma hinbewegen. In diesem Fall zeigen sich nur am Rande des Bildes Farbspuren, an seinen beiden Kanten gleichsam. Daher bezeichne ich dies Bild als Kantendoppelspektrum.<sup>5</sup>

Was haben wir – angesichts der neuen Beobachtung – von Newtons Behauptung zu halten, dass das weiße Sonnenlicht u.a. grüne Lichtbündel enthalte? Warum kann man dieses grüne Licht nicht unmittelbar hinter dem Prisma auffangen?

Es ist wichtig zu sehen, dass Newtons Theorie hierauf noch eine Antwort parat hat: Die weiße Lücke im Farbstreifen unmittelbar hinter dem Prisma lässt sich als Überlagerung verschiedenfarbiger Lichtbündel deuten, die parallel vom Fensterladenloch zum Prisma gelangt sind und (trotz unterschiedlicher Ablenkung auf dem Weg durchs Prisma) noch nicht weit genug voneinander entfernt sind, um getrennt aufgefangen werden zu können, siehe Abb. 5.

### III. Goethe schiebt den Schirm nach hinten – Entdeckung des Endspektrums

So weit, so schön. Nun tritt der alte Fuchs Goethe abermals auf den Plan und schlägt mit unschuldiger Miene vor, den Schirm wieder weiter vom Prisma zu entfernen, und zwar viel, viel weiter als in Newtons Arrangement.

Was passiert dann? Was erwarten Sie zu sehen?

Je größer dieser Abstand, so möchte man meinen, desto mehr farbliche Nuancen im aufgefangenen Spektrum. Denn mit wachsendem Abstand wächst die Breite des Spektrums, bietet also mehr Platz für die Entwirrung verschiedenfarbiger Lichtbündel, die einander bei Platzmangel noch in die Quere kommen. Ein überzeugender Gedanke, nicht wahr?

Jetzt die Überraschung: Wenn man die Projektionsfläche weiter vom Prisma entfernt als Newton, dann verringert sich die newtonische Farbenvielfalt, und die Farben Rot, Grün und Blau verschlingen nach und nach den ganzen Rest.<sup>6</sup> Bei doppeltem Abstand zum Beispiel keine Spur von Gelb oder Türkis! Den entsprechenden Vergleich zwischen diesem dreifarbigem Endspektrum und dem fünffarbigen Vollspektrum haben wir in Abb. 6 zusammengestellt.

Als ich bei Goethe das erste Mal von dieser Farbreduktion las, wollte ich es nicht glauben. Hat Goethe vielleicht schludrig beobachtet? Oder gar gelogen? Bevor ich solche Zweifel loswurde, musste ich erst selber durchs Prisma schauen. Und staunte: Wohin waren – bei verdoppeltem Abstand – Gelb und Türkis verschwunden? Wer hat sie gestohlen?

Mit dieser Frage und klammern Mut fuhr ich im Mai des Jahrs 2007 auf den naturwissenschaftlichen Campus unserer Universität vor den Toren Berlins. Der promovierte Optiker Christian Rempel hatte eine Reihe von Physikern zu einem interdisziplinären Seminar über Goethes Farbenlehre eingeladen, das ich mit einem Vortrag eröffnen sollte; und nicht wenige Experten waren der Einladung gefolgt. Nachdem ich meine verwirrte Frage gestellt hatte, brach unter den Physikern eine

5 Die beschriebenen Beobachtungen finden sich in Goethe [1810b]: §197, §201, §214 et passim. Mehr dazu in Müller [2007], Abschnitte 3 – 4.

6 Siehe Goethe [1810b]: §216.

Abb. 7

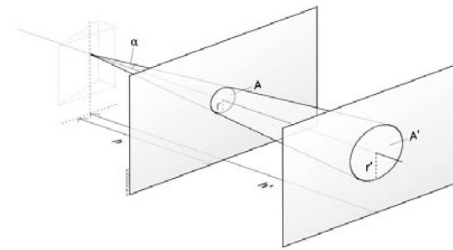


Abb. 7. Lichtkegel einer punktförmigen Lichtquelle. Die Leuchtdichte (Lichtintensität in einem Querschnitt des Lichtkörpers) verteilt sich bei verdoppeltem Abstand. [mh].

Abb. 8. Lichtkeil. Wer paralleles weißes Licht an einer durchsichtigen Fläche (zum Beispiel aus Glas) bricht, erzeugt einen Lichtkeil, dessen Querschnitt sich bei verdoppeltem Abstand nur verdoppelt. Anders als im Fall eines Lichtkegels (Abb. 7) halbiert sich daher beim Lichtkeil die Leuchtdichte (Lichtintensität in einem Querschnitt des Lichtkörpers) bei verdoppeltem Abstand. An diesem Zusammenhang ändert sich natürlich auch nichts bei mehrfacher Brechung (in identischer Richtung, zum Beispiel an einem Prisma); der Lichtkeil spreizt sich dadurch in größerem Winkel auf, aber sein Querschnitt wächst wieder nur in einer Dimension. [mh].

Abb. 8

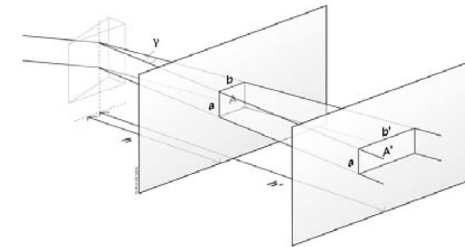


Abb. 9

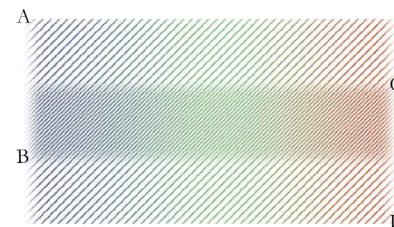


Abb. 9. Schema der teilweisen Überlappung zweier Spektren. Das eine Spektrum (AB) wird oben auf den Projektionsschirm geworfen, das andere (CD) unten, und zwar so, dass sie sich in der horizontalen Schirmmitte (CB) überlagern: Die untere Hälfte des oberen Spektrums AB und die obere Hälfte des unteren Spektrums CD kommen zur Deckung. [mh].



Debatte los. Ein Physiker monierte, dass in dem Experiment *keine anständige, moderne Vorphotik* vorkomme.<sup>7</sup> Ein anderer schlug vor, ins breite Endspektrum ein Spektrometer hineinzuhalten, dann könne man eindeutig nachweisen, welche Wellenlängen sich an der Grenze zwischen Rot und Grün tummeln – dort, wo eigentlich gelbes Licht (einer Frequenz von grob 515 THz) zu erwarten wäre.<sup>8</sup> Die Debatte lieferte kein eindeutiges Ergebnis, und so ist es mir seitdem immer wieder gegangen, wenn ich Physiker mit der überraschenden Beobachtung Goethes aus der Reserve zu locken versuchte.

Deshalb habe ich mich entschlossen, die Sache aus gutem Anlass selbst in die Hand zu nehmen. Der Diplom-Physiker Matthias Rang vom Goetheanum in Dornach wollte von mir einen Beitrag für die Geburtstagsausstellung zu Goethes Farbenlehre. Er hat sich im Gegenzug bereiterklärt, mir alle Experimente aufzubauen, nach denen mich verlangt. Diese Gelegenheit musste ich beim Schopfe packen.

#### IV. Störfaktor Auge?

Beginnen wir mit einer kleinen Vorüberlegung. Einerseits könnte, rein theoretisch, das dreifarbiges Endspektrum, das Goethe entdeckt hat, als empirische Widerlegung der newtonischen Theorie gewertet werden; denn dies Spektrum passt nicht zu dem, was die Theorie vorausagt.<sup>9</sup> Doch hat sich Newtons Theorie in so vielen Bereichen bewährt und gilt als Grundlage so vieler naturwissenschaftliche Errungenschaften der letzten Jahrhunderte, dass wir diesen Schatz nicht leichten Herzens aus der Hand geben sollten; das wäre waghalsig. (Zu Goethes Zeiten wäre das auch schon waghalsig gewesen, aber lange nicht so waghalsig wie heutzutage).

Andererseits beruht Goethes Entdeckung nicht auf Schlampereien beim Experimentieren oder Beobachten. Die Entdeckung lässt sich reproduzieren, und zwar mit Sonnenlicht genauso wie mit dem Licht hinreichend star-

ker Lampen – jedenfalls für die allermeisten Beobachter.<sup>10</sup> Also sind vermutlich systematische Störeinflüsse für die Entdeckung verantwortlich.

Welche könnten das sein? Nahe liegt es zu vermuten, dass das menschliche Auge Gelb und Türkis zum Verschwinden bringt.<sup>11</sup> Seit Jahrzehnten wissen wir, wie stark man subjektive Farbeindrücke manipulieren kann. Denken Sie nur an die satt roten Tomaten im Kunstlicht des Supermarkts, die zuhause grünlich braun aus den Einkaufstüten herauspurzeln. Eine andere Verfälschung gesehener Farben zeigt die Überschrift des nächsten Abschnitts:

7 Ich komme auf diesen Vorschlag in Fußnote 26 zu Abschnitt IX zurück.

8 Auch auf diesen Vorschlag komme ich noch zurück, siehe Fußnote 25 zu Abschnitt IX.

9 Duck kommentiert: *Since we know that he [i.e., Newton – O.M.] was a most observant and thorough experimenter it is reasonable to assume that he also observed the disappearance of yellow and blue [i.e., cyan – O.M.], but chose to ignore the fact. It is certain that he would have had the greatest difficulty in explaining it away—without having any of our knowledge of the complicated response patterns of the eye's rods and cones* [Duck [1987]: 795]. Newton hat also offenbar im entscheidenden Moment weggeschaut; das muss uns nicht schockieren. Seit Kuhn wissen wir, dass Naturwissenschaftler oft und mit völligem Recht die Behandlung einer Anomalie auf später vertagen [Kuhn [1970]].

10 Diese Einschränkung werde ich im Abschnitt VIII wieder aufgreifen, siehe Fußnote 22.

11 So auch Rupprecht Matthaei [1971]: 46.

12 Das ist der sog. Bezold/Brücke-Effekt. Locus classicus sind Bezold [1873]: 235–239 [= §10] sowie Brücke [1878]. Siehe auch Purdy [1937], Purdy [1931]. Dass dieser Effekt mit unserem Problem zu tun haben könnte, behauptet Duck [1987]: 794/5; Holtsmark widerspricht, aber nicht mit empirischen Argumenten, sondern mit erklärungs-theoretischen; siehe Holtsmark [1992]: 10. Mehr zu diesem Thema in Fußnote 16.

#### V. Nachts sind gelbe Katzen grau

Unsere Farbwahrnehmung lässt bei abnehmender Beleuchtung nach, das ist bekannt.<sup>12</sup> Könnte allein dieser Zusammenhang für den Gelbverlust im Endspektrum verantwortlich sein? Das zumindest besagt meine erste Hypothese, die Verdunkelungshypothese. Überprüfen wir sie.

Wir nehmen eine Niedervolt-Halogen-Lampe mit kontinuierlichem Spektrum, deren Licht zwar nicht so stark leuchtet, abgesehen davon aber ungefähr so zusammengesetzt ist wie das der Sonne.<sup>13</sup> Nun ist die Sonne (im Vergleich zur Lampe) so gut wie unendlich weit von uns entfernt. Die Sonnenstrahlen erreichen uns daher nahezu parallel. Damit das Lampenlicht auch in dieser Hinsicht dem Sonnenlicht ähnelt, schalten wir vor die Lampe eine Linse. Ohne Prisma verlöre das so erzeugte parallele Lichtbündel idealerweise auch mit wachsender Entfernung von der Lampe keine Leuchtkraft; sein Durchmesser bliebe konstant, und die Luft ist rein.

Schicken wir dies parallele Lichtbündel im horizontalen Winkel von ca. 60 Grad durchs Prisma, so wird es beim prismatischen Ein- und Austritt beidemal nach rechts vom geraden Weg abgelenkt. Da sich rote Lichtbündel bei prismatischer Brechung weniger stark vom Weg ablenken lassen als blaue Lichtbündel, fächert sich der gesamte Lichtkörper (mit wachsendem Abstand vom Prisma) der Breite nach auf, wodurch die Leuchtdichte (Lichtintensität pro Fläche) abnimmt. Wir haben zwar überall – auf jedem Querschnitt – insgesamt gleichviel Lichtintensität, aber bei wachsendem Abstand nur auf einer breiteren Fläche; die Lichtintensität pro Fläche sinkt also. Doch anders, als man denken könnte, sinkt sie nicht mit dem Quadrat des Abstandes (wie im Fall einer punktförmigen Lichtquelle, die einen Lichtkegel aussendet, siehe Abb. 7). Sondern sie sinkt nur proportional zum Abstand. Denn unser Lichtkörper hinter dem Prisma hat keine Kegelgestalt; er fächert sich nur der Breite nach auf; seine Höhe bleibt (nahezu) konstant. Für die Begründung werfe man einen Blick auf Abb. 8: Das parallele Lichtbündel aus der

Halogenlampe wird beim Weg durchs Prisma nur nach rechts vom Weg abgelenkt, weder nach oben noch nach unten. Denn das Prisma steht aufrecht (auf seiner Grundfläche) und wird vom horizontalen Licht getroffen. Statt eines Lichtkegels mit in zwei Dimensionen wachsendem Querschnitt haben wir sozusagen einen Lichtkeil, dessen Schnitt nur in einer Dimension wächst.

Alles das bedeutet: Wenn wir den Abstand zwischen Prisma und Auffangschirm verdoppeln, so halbiert sich die Leuchtdichte der aufgefangenen Lichtbündel. Könnte es sein, dass ausgerechnet hell wirkende Farben aus Newtons Vollspektrum wie Gelb oder Türkis keine Halbierung ihrer Lichtstärke überleben? Verhielte es sich so, dann müssten Gelb oder Türkis auch bei doppeltem Abstand wieder zu neuem Leben erwachen – wenn, ja: wenn man ihnen mehr Lichtstärke verschafft.

Wie das? Es wäre keine gute Idee, die Halogenlampe mit einer Dimmer-Funktion zu bestücken und ihr Licht hinauf- oder herunterzuregeln; denn dadurch ändert sich die Brenntemperatur der Lampe, und wir können nicht sicher genug sein, ob in ihrem Licht die verschiedenen Wellenlängen dann immer noch zu gleichen Anteilen vorkommen. (Vielleicht steigt bei höherer Brenntemperatur der Gelbanteil in ihrem Licht?)

Daher habe ich Matthias Rang vorgeschlagen, das Endspektrum doppelt zu erzeugen, zweimal exakt übereinander. Wenn man diese beiden Spektren durch kleine Winkeländerungen (zur Horizontalen) halb ineinanderschiebt, so lassen sich auf dem Projektionsschirm drei horizontale Zonen ausmachen: oben und unten das bereits bekannte Endspektrum (ohne Gelb und Türkis), in der Mitte die optische Summe dieser beiden Endspektren. In der

13 Sie entsendet mehr rotes und weniger blaues Licht als die Sonne. Trotzdem liegt ihr *colour rendering index* nahe bei 100 Prozent. Das heißt, in ihrem Licht können Versuchspersonen fast alle ihnen vorgelegten Farbproben richtig erkennen.

mittleren Zone auf dem Schirm haben wir also an jeder Stelle doppelt so viel Licht wie oben und unten (siehe Abb. 9). Fuchs, Du hast das Gelb gestohlen, gib es wieder her!

Der Fuchs will nicht, schauen Sie selbst: Auch in der mittleren Zone verdoppelter Helligkeit – keine Spur von Gelb (siehe Abb. 10). Durch Überlagerung zweier Endspektren lässt sich das geraubte Gelb nicht zurückgewinnen. Genauso beim Türkis. (Um Platz zu sparen, werde ich von nun an das Türkis nicht immer eigens erwähnen. Alle noch folgenden Betrachtungen lassen sich grosso modo aufs Türkis übertragen. Dadurch gewinnen wir nicht viel – zumal unsere Farburteile in Sachen Gelb alles in allem deutlicher ausfallen als in Sachen Türkis. Es dürfte keine Farbe geben, deren Verunreinigung uns so stark auffällt wie beim Gelb; das jedenfalls sagt meine Erfahrung mit Farben und mit dem Begriff der „reinen“ Farbe).

#### VI. Rettungsversuche für die Verdunkelungshypothese

Um den anvisierten Erklärungsansatz zu retten, könnte man vermuten: Vielleicht ist es uns nicht gelungen, die rein theoretische Verdopplung der Lichtstärke experimentell zu verwirklichen? Vielleicht ist uns unterwegs zuviel Licht abhanden gekommen?

Gehen wir auf Nummer sicher, und prüfen wir die Verdunkelungshypothese aus einer anderen Richtung. Sollte sie zutreffen, so müssten wir ein newtonisches Vollspektrum mit gelbem Feld so lange verdunkeln können, bis es sich in ein gelbfreies Endspektrum verwandelt. Also erzeugen wir ein newtonisches Vollspektrum mit den fünf Farben

rot, gelb, grün, türkis, violett,

und verdunkeln es Schritt für Schritt. Zuerst halbieren wir seine Lichtstärke. Ein Strahlteiler wird vor die Lampe montiert (siehe Abb. 11). Er lässt die Hälfte aller Lichtstrahlen passieren; die andere Hälfte wirft er zurück. Was sehen Sie? Das Spektrum erscheint etwas

dunkler; aber sein gelber Teil bleibt unangestastet und ungeraubt.

Übrigens erscheint das Spektrum nicht etwa halb so dunkel wie im Fall ohne Strahlteiler; es erscheint bloß ein bisschen dunkler. Woran liegt das? Die Antwort ist seit dem Weber/Fechner-Gesetz bekannt (und gilt für beliebige Sinnesempfindungen, nicht nur für visuelle): Unser Helligkeitsempfinden nimmt nicht proportional zur Lichtstärke ab, sondern logarithmisch. Dieser logarithmische Zusammenhang war Gold wert im Kampf ums Dasein. Ihm ist es zu verdanken, dass wir in Situationen drastisch verschiedener Lichtstärke immer noch gleichermaßen gut sehen können.<sup>14</sup>

Fein; um also auch jedes logarithmische Schlupfloch für Anhänger der Verdunkelungshypothese zu verstopfen, strengen wir uns noch stärker an und fünfteln oder zehnteln die Helligkeit des Lampenlichts.<sup>15</sup>

14 Angesichts dieser Zusammenhänge fragen Sie vielleicht: Beseitigt der Strahlteiler wirklich genau die Hälfte des Lichts aus unserem Experiment? Beseitigt er vielleicht viel weniger Licht, als seine Hersteller behaupten? – Keine Sorge, das lässt sich überprüfen. Das vom Strahlteiler beiseitegeräumte Licht geht nicht verloren – es wird woandershin geworfen. Wenn wir es dort denselben Bedingungen unterwerfen wie das Licht, das er durchlässt, werden wir ein zweites Spektrum auffangen. Da es genauso aussieht wie das davor aufgefangene Spektrum, dürften beide [grob] gleichviel Lichtintensität haben. Wegen des Energieerhaltungssatzes ist dies jeweils halbsoviel wie in dem Spektrum, das ohne Strahlteiler entsteht.

15 Das ist mehr als vorsichtig und wäre – strenggenommen – nicht nötig. Wie erläutert, wissen wir, dass sich das Vollspektrum durch Abstandsverdopplung, also schon durch objektive Halbierung der Helligkeit, in ein Endspektrum überführen lässt. Dass diese objektive Halbierung das subjektive Helligkeitsempfinden logarithmisch [statt einfach proportional] verringert, tut nichts zu Sache, denn der Fuchs raubt das Gelb nun einmal bei doppeltem Abstand, mithin halber Lichtintensität.

Abb. 10. Fotodokumentation der teilweisen Überlappung zweier Endspektren. Das eine Endspektrum wird oben auf den Projektionsschirm geworfen, das andere unten, und zwar so, dass sie sich in der Schirmmitte überlagern. Trotzdem taucht auch in der horizontalen Schirmmitte das Gelb nicht wieder auf, trotz dort verdoppelter Intensität [mr].



Abb. 10

Abb. 11

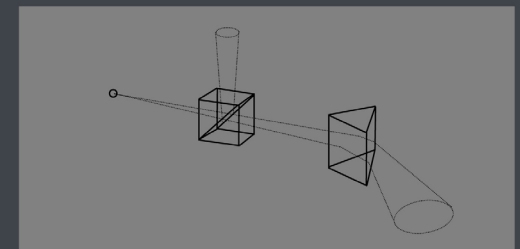


Abb. 11. Schema eines Versuchs zur Lichtverringering eines Vollspektrums. Das Ausgangslicht eines Vollspektrums verliert durch einen Strahlteiler an Intensität. [mr].

Abb. 12



Abb. 12. Fotodokumentation des Versuchsergebnisses einer Lichtverringering. Selbst wenn das Ausgangslicht eines Vollspektrums zu 80-90% von einem Graukeil verschluckt wird, bleibt das Gelb im Vollspektrum erhalten. [mr].



Ein Graukeil wird dem Strahlengang vors Prisma in den Weg gestellt, er verschluckt bis zu 90% der Helligkeit unserer Lampe. Schauen Sie wieder selbst, das Gelb des Vollspektrums beseitigt auch er nicht (Abb. 12). Kurzum, der diebische Fuchs hat als Hilfsmittel weder Graukeil noch Strahlteiler im Räubersack.<sup>16</sup>

## VII. Farbverschlingende Umgebungen

Zeit für eine neue Hypothese. Welchen Farbeindruck wir in einer halbwegs einheitlich leuchtenden Figur wahrnehmen, hängt nicht nur von der Farbe der Figur ab. Es hängt auch davon ab, in welche Umgebung diese Figur eingebettet ist. So wirkt ein schmutziges Ocker plötzlich quietschgelb, sobald wir ihm eine blaue Umgebung verpassen. Das Blau dieser Umgebung lockt aus dem Ocker sozusagen das Gegenteil des Blaus hervor, dessen Komplement. Und die Komplementärfarbe von Blau ist Gelb.<sup>17</sup>

Hat sich unser Fuchs vielleicht einen derartigen Mechanismus zunutze gemacht und sich mit seiner gelben Beute in der bunten Umgebung des geraubten Gelbs versteckt?

Um den Verdacht zu erhärten, müssen wir empirisch überprüfen, ob die rote/grüne Nachbarschaft im Spektrum für den Effekt verantwortlich ist. Verhielte es sich so, dann müssten wir diese missliche Nachbarschaft bloß aus dem Endspektrum entfernen, um das Gelb wieder hervorzulocken. Dem werde ich im verbleibenden Teil meiner Betrachtung nachgehen.<sup>18</sup>

Wie beseitigt man unerwünschte Teile aus irgendwelchen Spektren? Es reicht nicht, den Schirm, auf dem das Spektrum aufgefangen wird, teilweise abzudecken, etwa mithilfe schwarzer Kartons. Denn selbst der schwärzeste Karton schluckt längst nicht alles Licht; störende Reflexionen könnten sich ins optische Geschehen einmischen und das Experiment verderben.

Eine Möglichkeit, der Schwierigkeit zu entinnen, bestünde darin, die unerwünschten Teile

des Spektrums zu beseitigen, indem man den Schirm dort wegschneidet, wo sie sich zeigen. Die unerwünschten Teile des Spektrums laufen dann am Restschirm (an einer Art Steg) vorbei und verlieren sich in der dahinterliegenden Dunkelheit. So könnte es funktionieren. Matthias Rang hat mir trotzdem davon abgeraten, dieser Möglichkeit nachzugehen. Und mit gutem Grund: Wir möchten die Größe der zu beseitigenden Bereiche des Spektrums variieren können, es gibt aber keine geeigneten Stegvorrichtungen variabler Breite.

Daher kommen wir doch wieder auf die schwarzen Kartons zurück. Wir setzen sie aber nicht auf derjenigen Seite des Projektionschirms ein, auf die das Prisma sein Spektrum

16 Im Gegensatz dazu hat Brücke das Gelb aus dem Vollspektrum doch durch Verdunkelung beseitigen können, siehe [1878]: 54. [Zitiert nach Holtsmark [1992]: 12]. Dass das möglich ist, könnte damit zu tun haben, dass gelbes Spektrallicht bei verringerter Lichtintensität seinen Farbton schneller verliert als andersfarbige Spektrallichter [Purdy [1931]: 546, Duck [1987]: 794/5]. Aber dieser Effekt kann den Gelbraub bei verdoppeltem Projektionsabstand eines refrangierten Parallelstrahls nicht vollständig erklären, wie unsere Experimente zeigen. Ähnlich schon Purdy [1931]: 555, 559. [Duck diskutiert nur Fälle des Endspektrums, in denen die Leuchtdichte mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, Duck [1987]: 794/5].

17 In diesem Zusammenhang gibt es eine bunte Kaskade optischer „Täuschungen“ unseres Farbempfindens, angefangen bei Goethes farbigen Schatten bis hin zu den schockierenden Effekten, die Edwin Land entdeckt hat. Siehe Goethe [1810b]: §62-§80 und Land [1959a], [1959b]. Beide Arten von Phänomenen sind Spezialfälle des sogenannten Simultankontrasts. Dass sie eng miteinander zusammenhängen, zeigen Wilson et al [1960].

18 Um nicht missverstanden zu werden: Meine neue Hypothese läuft nicht auf die Behauptung hinaus, dass der Gelbraub zu den Phänomenen des Simultankontrasts gehörte [siehe vorige Fußnote]. Wenn überhaupt, dann bieten Gelbraub und Simultankontrast recht verschiedene Beispiele eines umgreifenderen Effekts, der ganz allgemein mit Umgebungsfarben zu tun hat.

sendet, sondern auf dessen Rückseite. Störende Reflexionen sind dadurch ausgeschlossen. Natürlich funktioniert dieser Plan nur, wenn sich das Spektrum auch auf der Rückseite unseres Schirms zeigt. Der Schirm darf also nicht völlig opak sein – er muss Licht zumindest teilweise hindurchlassen. Am besten eignet sich für unsere Zwecke ein Schirm, der auf seiner Vorderseite genau dasselbe spektrale Projektionsbild zeigt wie auf seiner Rückseite. Wir könnten dafür zum Beispiel eine farbneutrale, sandgestrahlte Glasscheibe benutzen – oder noch einfacher: weißes Seidenpapier. (In hochgestochener Redeweise: Beleuchtetes Seidenpapier funktioniert aufgrund vergleichbarer Transmissions- und Reflexionskoeffizienten nahezu wie ein Isotrop-Strahler).

Aus alledem ergibt sich folgender Versuchsaufbau. Auf den Seidenpapier-Schirm wirft unser Prisma ein 50 cm breites Endspektrum mit den Farben Rot, Grün, Blau. Das Spektrum sieht auf der Vorderseite des Schirms genauso aus wie auf der Rückseite. Bei Betrachtung des Schirms von hinten werden Sie nicht geblendet – selbst dann nicht, wenn Sie direkt in Richtung des Prismas auf den Schirm starren.<sup>19</sup> Auf der Rückseite haben wir den Schirm allerdings horizontal halbiert, mithilfe eines horizontalen schwarzen Kartonstreifens (siehe Abb. 13). In der unteren Hälfte werden wir einzelne Zonen des Endspektrums aussondern (mithilfe der schon besprochenen Vorrichtung beweglicher Kartons), die obere Hälfte werden wir zum Vergleich stets unangetastet lassen.

Nach allen diesen Vorbereitungen können Sie also die zwei beweglichen schwarzen Kartons an der unteren Schirmrückseite zusammenschieben, um beliebige Portionen des Spektrums auszusondern; und zwar in jeder gewünschten Breite. Uns interessiert derjenige Ort des Endspektrums, wo Rot und Grün aneinanderstoßen und wo wir die gelbe Zone vermissen – der Ort des Gelbdiebstahls. Wenn die schwarzen Kartons nur diesen Ort mit einer Breite von ca. 1 cm freilassen: Was sehen Sie dann?

## VIII. Das Gelb taucht auf – verwirrende Effekte

Voilà, der Fuchs hat das Gelb wieder hergegeben.<sup>20</sup> Siehe Abb. 14. Das Gelb strahlt zwar nicht so hell, wie wir's vom fünffarbigen Vollspektrum oder vom vierfarbigen Kantendoppelspektrum gewohnt sind; es ist dunkler. Aber es ist kein verschmutztes Gelb, kein bräunliches oder rötliches und grünliches Gelb. Jedenfalls kann man den 1 cm breiten Kartonspalt so placieren, dass das gelbe Feld weder ins Grünliche noch ins Rötliche tendiert; in diesem Fall bietet das gelbe Feld einen völlig homogenen Farbeindruck.<sup>21</sup>

Alles in allem ein rätselhafter Effekt. Immerhin haben wir nur eine bestimmte Zone aus einem physikalisch unveränderten Spektrum ausgesondert. Wieso verändert diese Zone ihre Farbe? Schauen Sie zum Vergleich aufs

19 Ich betone dies deshalb, weil meiner Erfahrung nach Blendungen am ehesten zu Gelb-Eindrücken führen und weil Sie bei einer anderen Variation des Experiments sehr wohl geblendete Wahrnehmungen hätten – nämlich dann, wenn wir den Projektionschirm am fraglichen Punkt durchlöchern würden und Sie dann durch das Loch direkt ins Ihnen entgegenkommende, gleißende Spektrum schauten. Das Licht, das Ihre Retina dann registrierte, wäre um Größenordnungen heller als im Fall unseres halbttransparenten Schirms aus Seidenpapier. – Auf die Idee, das Spektrum auf der Rückseite eines Schirms zu betrachten, bin ich gekommen, nachdem ich eine solche Vorrichtung zum ersten Mal bei Ingo Nussbaumer gesehen habe [während einer informellen Farben-Tagung in Adlershof im Februar 2009]. Ingo Nussbaumer hatte die Sache damals allerdings eigens so eingerichtet, dass das Spektrum auf der Rückseite des Schirms intensiver leuchtet als auf der Vorderseite.

20 Von dieser Beobachtung berichtet schon Rupprecht Matthaei [1971]: 46.

21 Sobald man den Kartonspalt weiter öffnet, verschwindet diese Homogenität des Farbeindrucks. Fortsetzung nächste Seite



komplette Endspektrum in der oberen Hälfte unseres Schirms. Müsste sich das Gelb nicht auch dort zeigen, an der Grenze zwischen Rot und Grün, also direkt über dem 1 cm breiten Kartonspalt? Rein physikalisch kommen hier genau dieselben Lichtstrahlen an wie unten. Warum sehen beide Bereiche trotzdem nicht gleich aus? Zeigt sich oben wirklich keinerlei Gelb?

Es ist an der Zeit für ein Geständnis. Verschiedene Betrachter reagieren auf diese entscheidende Frage unterschiedlich. Manch ein Betrachter kann das Gelb auch im kompletten Endspektrum (oben) ausmachen. Das ausgesonderte Gelb (unten) hilft dabei. Es erinnert sozusagen an die gelbe Zone oben im kompletten Endspektrum, die dann, zack! auch plötzlich zum Vorschein kommt.<sup>22</sup> Seltsam; oder? Der Effekt erinnert an das Motto eines bekannten Verlags für gehobene Reiseführer – man sieht nur, was man weiß.<sup>23</sup>

Falls es Ihnen nicht gelingt, eine gelbe Zone im kompletten Spektrum oben auf dem Schirm auszumachen, falls Sie immer noch nicht sehen, was Sie laut Newton sehen müssten, können Sie ein wenig nachhelfen. Lassen Sie den gelben Kartonspalt unten auf dem Schirm dort, wo er ist; beseitigen Sie aber den schmalen Kartonsstreifen, der den gesamten Schirm der Länge nach halbiert und der dadurch das obere Spektrum vom unteren abgrenzt. Ursprünglich haben wir diesen Trennungstreifen deshalb eingeführt, weil wir das homogene Gelb unten nicht gern von der bunten Vielfalt des Spektrums oben durcheinanderbringen lassen wollten; *splendid isolation*. Jetzt stellen wir uns dem Chaos und sind neugierig, wohin das führt.

Also, weg mit dem Trennungstreifen. Schauen Sie zunächst auf den 1 cm breiten Kartonspalt unten; er ist immer noch gelb, nicht wahr? Jetzt lassen Sie Ihre Augen langsam, langsam senkrecht nach oben wandern – bis Sie schließlich dort ankommen, wohin der Kartonspalt nicht mehr reicht: damit ist Ihr Blick ins komplette Spektrum gelaufen. Sehen Sie jetzt dort etwas Gelbes? Viele stimmen zu; manche widersprechen. Offenbar haben wir

es mit einem delikaten Effekt zu tun, der nicht bei jedem gleich gut funktioniert.

Wie Sie selber gespürt haben werden, strengen solche Beobachtungen unsere Augen an. Woran liegt das? Laut rein physikalischer Theorie ist das Spektrum selber völlig statisch (solange zum Beispiel die Lampe unverändert ihren Dienst tut). Die gesehenen Farben oben im Endspektrum wirken aber alles andere als statisch. Unsere Augen lösen die Statik auf, erzeugen Änderungen, und dann Änderungen der Änderungen usw. Dass das anstrengt, muss uns kaum wundern; dass es keine ganz

Fortsetzung 21 Anders zum Beispiel im Innern der grünen Zone des Endspektrums rechts nebenan; hier bietet sogar ein 5 cm breiter Kartonspalt vollkommene Homogenität im grünen Farbeindruck. Diese Homogenität ist genauso verwirrend wie der Verlust des Gelbs aus dem Endspektrum. Denn wieder gehen Farbnuancen verloren, die sich laut newtonischer Theorie eigentlich immer stärker ausdifferenzieren müssten. Unser Problem betrifft also nicht nur Gelb und Türkis, sondern am Ende viele Grün-Schattierungen, und genauso die Rot- und Blau-Schattierungen. – Das oben beschriebene, homogen aussehende Gelb wirkt übrigens genau wie das Gelb des Vollspektrums nicht gelb genug, wenn man es mit dem Gelb des Kantendoppelspektrums vergleicht. Siehe Nussbaumer [2008]: 173/4.

22 Ja, es gibt sogar Betrachter, die ohne Hilfe dieser Erinnerung ein Gelb im Endspektrum sehen – jedenfalls in den Endspektralen aus den hier besprochenen Experimenten. Daher habe ich Matthias Rang gebeten, noch ein wirklich eindeutiges Endspektrum aufzubauen, in dem kein normalsichtiger Mensch auch nur Spuren von Gelb ausmacht. Er ist der Bitte gefolgt, musste dafür aber etwas mehr Technik aufbieten als für die Experimente meiner kleinen Serie. Diesen Extra-Aufwand eigens zu erläutern, würde unseren Rahmen sprengen.

23 Das Motto geht auf Goethe zurück: *Man erblickt nur, was man schon weiß und versteht* [aus einem Gespräch mit F. v. Müller vom 24.4.1819].

Abb. 13

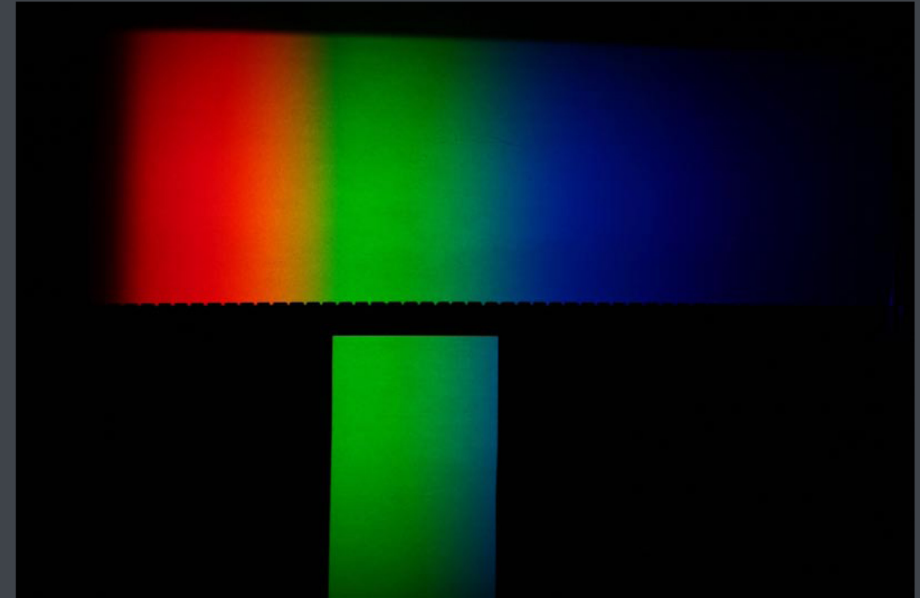


Abb. 14

Abb. 13. Aussonderung von Teilen eines Endspektrums (Versuchsvorbereitung). Das Foto zeigt die Rückseite des spektral beleuchteten Auffangschirms aus Seidenpapier. Oben sieht man das komplette Endspektrum, darunter eine Trennlinie aus schwarzem Karton. Sie enthält kleine Skalenschnitte von 1 cm Abstand. Unter der Trennlinie sehen Sie die beiden schwarzen Kartons, die sich horizontal gegeneinander verschieben lassen; im Bild geben sie eine 10 cm breite Zone des Endspektrums frei, in der sich überwiegend grüne Farben zeigen. [mr].

Abb. 14. Voilà, das Gelb. Das Foto dokumentiert die Rückseite des spektral beleuchteten Auffangschirms aus Seidenpapier (wie in Abb. 13). Die beiden schwarzen Kartons lassen an der Grenze zwischen Rot und Grün genau eine enge Lücke des Endspektrums frei; sie ist 1 cm breit. Dort zeigt sich das geraubte Gelb. [mr].

eindeutigen Ergebnisse liefert, ebenfalls nicht.<sup>24</sup>

Trotz aller dieser Schwankungen steht eines fest. Am allerdeutlichsten zeigt sich im Endspektrum das Gelb dort, wo es von seiner angestammten rot/grünen Umgebung abgeschirmt wird. Und das bedeutet, dass sich der Fuchs in der Tat dieser Umgebung bedient hat, um das Gelb zum Verschwinden zu bringen – oder, vorsichtiger ausgedrückt, um es zu verstecken, zu verheimlichen, zu vertuschen, jedenfalls: zu verringern.

## IX. Ausblick: Fragen über Fragen

Heißt das alles, dass das Gelb nun wirklich im Endspektrum vorkommt oder nicht? Klar ist, dass im Endspektrum an der fraglichen Stelle Lichtwellen ankommen, deren Frequenz traditionell gelben Farbeindrücken zugeordnet wird. Aber das ist keine Antwort auf unsere Frage. Die Frage handelt vom Gelb, nicht von irgendwelchen Lichtfrequenzen.<sup>25</sup>

Vielleicht müssen wir die Frage zurückweisen. Denn was soll es heißen, dass diese oder jene Farbe wirklich in einem Spektrum vorkommt? Bedenken Sie: Wenn wir irgendeinen Ausschnitt aus dem bunten Spektrum herauslösen und mittels eines schwarzen Kartonspalts in eine schwarze Umgebung einbetten, dann tauschen wir einfach nur eine – bunte – Umgebung des fraglichen Ausschnitts durch eine andere – schwarze – Umgebung aus. Auch eine schwarze Umgebung ist eine Umgebung und beeinflusst das Geschehene. Welche der beiden Umgebungen zu bevorzugen ist, lässt sich nicht objektiv entscheiden. Schwärze ist ja nicht einfach die Abwesenheit visueller Eindrücke; sie ist ein eigener visueller Eindruck. (Die Abwesenheit visueller Eindrücke hat eine andere Phänomenologie. Wer sich zum Beispiel beim Musikhören so sehr in die Klänge vertieft, dass alle anderen Sinnesmodalitäten verschwinden, wer also sogar mit offenen Augen nicht mehr auf das achtet, was zu sehen wäre, der registriert keine Schwärze. Er registriert nur Geräusche, sonst nichts. Weil uns dies im Dunkeln leichter fällt als bei Helligkeit,

nehmen wir irrigerweise an, dass fehlende Gesichtseindrücke schwarz wären).

Was ist bei unseren Experimenten und Überlegungen herausgekommen? Weit weniger, als ich gehofft habe, während ich diesen Beitrag plante. Wir haben keine eindeutige Erklärung entdeckt. Wie der Fuchs das Gelb gestohlen, mithilfe welcher Tricks er uns hinter das Licht geführt hat, ist weiterhin alles andere als klar. Zwar wissen wir, dass der Fuchs seinen Raub nicht einfach nur im Schutz der Dunkelheit (bei Lichtverlusten infolge steigender Abstände) ins Werk zu setzen vermag. Und wir wissen, dass der Gelbdiebstahl in der Verwirrung rot/grüner Umgebungen stattfindet.

24 Diese Schwankungen erinnern nicht wenig an die Gestaltwechsel, die wir an Kippbildern erleben und die wir ebenfalls nicht willentlich anhalten können. [Siehe Pöppel [1987]: 55–60]. Ingo Nussbaumer hat darauf hingewiesen, dass unsere Farbwahrnehmung ein und derselben farbigen Fläche ganz ähnlich umkippt. Wenn wir auf ein gelbes Feld starren, so schlägt der Farbeindruck nach einer Weile von allein ins Grünliche um, dann wieder ins Rötliche usw. Siehe Nussbaumer [2005].

25 Das wird vielleicht anhand folgender Frage klarer: Wie funktioniert das Spektrometer, mit dessen Hilfe wir den Vorschlag des zweiten Experten aus Abschnitt II aufgreifen könnten, um nachzuschauen, was im Endspektrum an Ort und Stelle ankommt? Antwort: Das Spektrometer misst keine Farben, es bestimmt wieder nur durch Refraktionen [oder, was am Ende auf dasselbe hinausläuft, durch Beugungen am Gitter] die sozusagen geometrisch bestimmbaren Eigenschaften des aufgefangenen Lichts. Und dass an der fraglichen Stelle Licht der und der Brechungseigenschaften ankommt, ist schon durch den Ort festgelegt, an dem das Licht eben ankommt. Der Test mit dem Spektrometer liefert also keine Evidenzen zugunsten Newtons Äquivalenztheorem, zugunsten des Theorems, dass jedem Grad an Refrangibilität homogenen Lichts ein ganz bestimmter Farbeindruck korrespondiert und umgekehrt. [Siehe Punkt 2 der Zusammenfassung der newtonischen Lehre, Newton [1672]: 3081].

Wie wenig damit gewonnen ist, will ich mit vier abschließenden Fragen demonstrieren. Es sind Fragen, deren Antwort offenbleibt, nach allem, was ich gezeigt und gesagt habe.

Erste Frage: Wenn sich das Gelb im Endspektrum nicht halten kann, solange es rot/grün eingerahmt ist – wieso kann es sich dann im Vollspektrum halten? Immerhin ist es dort ebenfalls rot/grün eingerahmt. (Siehe Abb. 2).

Dies Rätsel führt uns sogleich zur zweiten Frage: Worin unterscheiden sich die roten und grünen Felder im Vollspektrum von ihren Abkömmlingen im Endspektrum? Sicher, die roten und grünen Felder breiten sich mit wachsendem Schirmabstand aus – aber warum tun dies nicht genauso die gelben Felder bzw. die türkisfarbenen? Warum weichen diese Felder zurück? (Siehe Abb. 3).

Mit meiner dritten Frage gehe ich – in der eingeschlagenen Richtung – über die ersten beiden Fragen hinaus, auf der Suche nach Unterschieden zwischen End- und Vollspektrum: Das Endspektrum bietet zwar (in seiner ganzen Breite) weniger Lichtintensität als das Vollspektrum, aber dieser Unterschied ist nicht für den Gelbraub verantwortlich, wie dargetan (Abschnitte V, VI). Der einzige andere Unterschied zwischen den beiden Spektren betrifft deren Reinheit; das Endspektrum ist in jeder Zone physikalisch reiner als das Vollspektrum; soviel steht fest. Das lässt sich mit einem Spektrometer nachweisen.<sup>26</sup> Also können vergleichsweise unreine Zonen, die uns insgesamt rot bzw. grün erscheinen, kein Gelb verschlingen; während eher reine Rot- bzw. Grün-Zonen genau das schaffen.<sup>27</sup> Nur – warum?

Daran schließt sich meine vierte Frage an: Wieso verschlingen nicht die vergleichsweise reinen gelben und die vergleichsweise reinen türkisfarbenen Zonen im sich entfaltenden Spektrum das grüne Gebiet dazwischen? Und wieso schaffen diesen Trick dann wieder die grünen und blauen Zonen hoher Reinheit, nämlich beim Diebstahl des Türkis?<sup>28</sup>

Ich gebe es zu, ich bin verwirrt. Der intellektuellen Verwirrung gesellt sich noch eine sinnliche Verwirrung hinzu. Je länger ich auf die Spektren der verschiedenen Stufen starre, umso weniger sicher vermag ich zu sagen, was für Farben ich sehe. Werch ein Dulcheinjandl!<sup>29</sup>

Olaf Müller

26 Anders als der erste Experte aus Abschnitt II nahelegte, brauchen wir also Goethes [und Newtons] Experimente nicht deshalb zurückzuweisen, weil sie ohne Voroptik auskommen. Goethes [und Newtons] Lichtquelle ist die Sonne; sie ist so weit von uns entfernt, dass sie fast aus der Unendlichkeit ihre fast parallelen Strahlen zu uns schickt. Auch ohne eingebautes Linsensystem bekommen wir in der camera obscura ein scharfes Abbild; es wird umso schärfer, je weiter wir zurücktreten. Die Abstandsvergrößerung hat also denselben Effekt, den eine Voroptik hätte. Insofern ist Goethes Version des ursprünglichen Experiments besser als Newtons. – Ingo Nussbaumer ist im Februar 2009 in Adlershof mithilfe eines Experiments zu derselben Schlussfolgerung gekommen. Er hat das Gelb aus Newtons Vollspektrum auf der Rückseite eines transparenten Schirms ausgesondert [in eine schwarze Umgebung eingebettet] und dann durchs Prisma betrachtet; das Gelb spaltete sich in mehrere Farben auf, war also nicht homogen i.S. Newtons.

27 Dass sie “genau das” schaffen, ist übertrieben. Denn auch das Gelb ist im ersten Fall vergleichsweise unrein, im zweiten Fall vergleichsweise rein. Wir haben nicht geprüft, ob auch vergleichsweise unreines Gelb von vergleichsweise reinen rot/grünen Umgebungen verschlungen wird.

28 Im Vorübergehen werfe ich gleich eine noch verwirrendere Frage für Kenner der Komplementärspektren auf. Wieso vermögen ausgerechnet die stets unreinen Purpur-Zonen im Verein mit ebenfalls unreinen Türkis-Zonen des Komplementärspektrums nach und nach das Blau zu verschlingen? [Zu den Komplementärspektren siehe Goethe [1810b]: §215, Goethe [1810d]: 69; Kirschmann [1924], Kirschmann [1926], Kirschmann [1917]; Müller [2007], Abschnitte 6 – 9; Rang / Müller [2010]].

29 Ich danke Matthias Rang und Ingo Nussbaumer für zahllose Gespräche über Gelbdiebstähle. Dank an Matthias Herder für die Abb. 1, 3, 7 bis 9; Dank an Matthias Rang für die restlichen Abbildungen – und für unermessliche Geduld mit meinen experimentellen Wünschen.



## LITERATUR

- Adorno, Theodor W. [1967]: Über einige Relationen zwischen Musik und Malerei. In: *Musikalische Schriften I-III. Gesammelte Schriften*, Band 16. Frankfurt am Main.
- Agamben, Giorgio [2009]: *Signatura rerum. Über die Methode*. Frankfurt am Main.
- Albers, Josef [1963]: *Interaction of Color*. New Haven / London.
- Albers, Josef [1969]: One Plus One Equals Three or More. Factual Facts und Actual Facts. In: *Search-Versus Re-Search*. Hartfort.
- Bezold, Wilhelm von [1873]: Ueber das Gesetz der Farbmischung und die physiologischen Grundfarben. (=Poggendorffs Annalen der Physik, Band 30). S. 71-92, 221-247.
- Bjerke, André [1961]: *Neue Beiträge zu Goethes Farbenlehre*. Stuttgart.
- Blumenbach, Johann Friedrich [1805]: Von den Augen. In: *Handbuch der vergleichenden Anatomie*. Göttingen, S. 381-413.
- Blumenberg, Hans [1999]: *Goethe zum Beispiel*. Frankfurt am Main / Leipzig.
- Boehm, Gottfried / Spies, Christian / Egenhofer, Sebastian (Hg.) [2010]: *Zeigen. Die Rhetorik des Sichtbaren*. München.
- Böhme, Gernot (Hg.) [1997]: *Phänomenologie der Natur*. Frankfurt am Main.
- du Bois-Reymond, Emil [1882]: Goethe und kein Ende. Rektoratsrede in der Berliner Universität am 15. Oktober 1882. In: du Bois-Reymond, Emil 1886: *Reden von Emil du Bois-Reymond*, 1. Folge. Leipzig.
- Born, Max [1963]: *Betrachtungen zur Farbenlehre*. In: *Die Naturwissenschaften*. 50. Jg., Band 50, Heft 2, Berlin / Heidelberg S. 29-39.
- Brady, Ronald / Edelglass, Stephen / Maier, Georg [2008]: Being on Earth. Practice in Tending the Appearances. In: Grebe-Ellis, Johannes / Schön, Lutz-Helmut: *Phänomenologie in der Naturwissenschaft*, Band 5. Berlin.
- Brotbek, Stefan [2007]: *Das entzauberte Gespinst*. Zürich.
- Brücke, Ernst Wilhelm [1878]: Über einige Empfindungen im Gebiete der Sehnerven. (=Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Classe 77, iii, 221). S. 39-71.
- de Cusa, Nicolai [1440]: *De docta ignorantia. Die belehrte Unwissenheit*, 4. Auflage. Hamburg 1994.
- Daston, Lorraine / Galison, Peter [2007]: *Objektivität*. Frankfurt.
- Delanay, Robert [1991]: Über das Licht. In: Regel, Günther: *Paul Klee, Kunst-Lehre. Aufsätze - Vorträge - Rezensionen und Beiträge zur bildnerischen Formlehre*. Leipzig.
- Didi-Huberman, Georges [2009]: *Der Mensch, der in der Farbe ging*. Zürich / Berlin.
- Duck, Michael [1987]: The Bezold-Brücke phenomenon and Goethe's rejection of Newton's Opticks. In: *American Journal of Physics* Volume 55, No. 9, September 1987, S. 793-6.
- Eckermann, Johann Peter [1829]: *Gespräche mit Goethe in den letzten Jahren seines Lebens*. Gespräch vom 19.02.1829. In: Regine Otto / Peter Wersig (Hg.) 1984: *Eckermann. Gespräche mit Goethe in den letzten Jahren seines Lebens*. München
- Eisenberg, W. / Renner, U. / Trimper, S. / Fritzsche, B. / Vogelsang, K. (Hg.) [2000]: *Ernst-Heinrich Weber. (=Synergie, Syntropie, Nichtlineare Systeme, Heft 6)*.
- Förster, Eckart [2003]: Hegel in Jena. In: Welsch, Wolfgang / Vieweg, Klaus: *Das Interesse des Denkens. Hegel aus heutiger Sicht*. München, S. 109-129.
- Frieling, Heinrich [1995]: *Das Gesetz der Farbe*. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Göttingen.
- Gage, John [1969]: *Color in Turner. Poetry and Truth*. New York.
- Gerhard, Melitta [1940]: Verlauf und Bedeutung von Schillers und Goethes Begegnung im Juli 1794. In: *The Journal of English and Germanic Philology*, Band 39, Heft 1, S. 115-123.
- Glasauer, Stefan / Steinbrenner, Jakob (Hg.) [2007]: *Farben*. Frankfurt / Main.
- Goethe, Johann Wolfgang von [1787]: *Italienische Reise. Brief vom 6. September 1787*. Rom.
- Goethe, Johann Wolfgang von [1810]: *Die Schriften zur Naturwissenschaft. Erste Abteilung, Band 4 bis 7*. Leopoldina-Ausgabe. (Bearbeitet von Rupprecht Matthaei und Dorothea Kuhn, Weimar: Hermann Böhlau Nachfolger), 1955, 1957, 1958, 1957. Weimar.
- Goethe, Johann Wolfgang von [1810a]: Anzeige und Übersicht des Goethischen Werkes zur Farbenlehre. In: Goethe: *Die Schriften zur Naturwissenschaft*. Leopoldina-Ausgabe I 7, S. 1-17.
- Goethe, Johann Wolfgang von [1810b]: Entwurf einer Farbenlehre. Des ersten Bandes erster, didaktischer Teil. In: Goethe: *Die Schriften zur Naturwissenschaft*. Leopoldina-Ausgabe I 4, S. 11-266.
- Goethe, Johann Wolfgang von [1810c]: Enthüllung der Theorie Newtons. Des ersten Bandes zweiter, polemischer Teil. In: Goethe: *Die Schriften zur Naturwissenschaft*. Leopoldina-Ausgabe I 5.
- Goethe, Johann Wolfgang von [1810d]: Erklärung der zu Goethes Farbenlehre gehörigen Tafeln. In: Goethe: *Die Schriften zur Naturwissenschaft*. Leopoldina-Ausgabe I 7, S. 41-115
- Goethe, Johann Wolfgang von [1810e]: Materialien zur Geschichte der Farbenlehre. Des zweiten Bandes erster, historischer Teil. In: Goethe: *Die Schriften zur Naturwissenschaft*. Leopoldina-Ausgabe I 6.
- Goethe, Johann Wolfgang von [1810f]: Zur Farbenlehre. Sechste Abteilung. Sinnlich-sittliche Wirkung der Farbe. In: Von Ott, G. / Proskauer, O. 1988: *Zur Farbenlehre*, Band 1. Stuttgart.
- Goethe, Johann Wolfgang von [1810g]: *Naturwissenschaftliche Schriften*. In: Steiner, Rudolf 1883-1897: *Goethes Naturwissenschaftliche Schriften*. Fotomechanischer Nachdruck der Erstauflage in «Deutsche National-Literatur», 1975. Dornach.
- Goethe, Johann Wolfgang von [1823]: *Nachträge zur Farbenlehre*. In: *Zur Naturwissenschaft überhaupt*, Band 2, 1. Heft. Stuttgart / Tübingen.
- Goethe, Johann Wolfgang von [1965]: *Artemis-Gedenkausgabe der Werke. Briefe und Gespräche*. Band 16. Zürich.



- Goethe, Johann Wolfgang von [1971]: Goethes Gespräche. Dritter Band. Erster Teil der Biedermannschen Ausgabe. Zürich.
- Goethe, Johann Wolfgang von [1977a]: Farbenlehre, Band 1. Stuttgart.
- Goethe, Johann Wolfgang von [1977b]: Sämtliche Werke in 18 Bänden, Bd. 5. Zürich/ München
- Göbel, Thomas [1982]: Die Quellen der Kunst. Dornach.
- Gögelein, Christoph [1972]: Zu Goethes Begriff von Wissenschaft. Auf dem Wege der Methodik seiner Farbstudien. München.
- Grebe-Ellis, Johannes [2007]: Lesen im Buch der Natur. Zur Entwicklung einer phänomenologischen Lesekompetenz. In: Nordmeier, V. / Oberländer, A. (Hg.): Didaktik der Physik. Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG in Regensburg, Berlin.
- Gropius, Walter [1919]: Grundsätze des Bauhauses. In: Programm des Staatlichen Bauhauses in Weimar. Weimar.
- Grün, Klaus-Jürgen [2000]: Arthur Schopenhauer. München.
- Hausenstein, Wilhelm [1921]: Kairuan oder eine Geschichte vom Maler Klee und von der Kunst dieses Zeitalters. München.
- Hegel, Georg Friedrich [1970]: Phänomenologie des Geistes. Frankfurt am Main.
- Heisenberg, Werner [1980]: Die Goethesche und die Newtonsche Farbenlehre im Lichte der modernen Physik. In: Wandlungen in der Grundlagen der Naturwissenschaft. 10 Vorträge. Stuttgart, S. 85-106.
- von Helmholtz, Hermann [1892]: Goethes Vorahnungen kommender naturwissenschaftlicher Ideen. Rede auf der Generalversammlung der Goethe-Gesellschaft in Weimar am 11. Juni 1892. In: Deutsche Rundschau, 18. Jg., Heft 10, Juli 1892.
- Henning, Leopold von [1822]: Einleitung zu öffentlichen Vorlesungen über Goethes Farbenlehre. Berlin.
- Heitler, Walter [1962]: Der Mensch und die naturwissenschaftliche Erkenntnis. Braunschweig
- Holtmark, Torger [1970]: Newton's Experimentum Crucis Reconsidered. In: American Journal of Physics, Volume 38, No. 10, S. 1229-1235.
- Holtmark, Torger [1992]: Zur Phänomenologie der prismatischen Erscheinungen. In: Mathematisch-Physikalische Korrespondenz, Nr. 164, S. 8-22.
- Holtmark, Torger / Sällström, Pehr [2000]: The system of boundary colours. In: Eisenberg, W. / Renner, U. (Hg.): Ernst-Heinrich Weber. (=Synergie, Syntropie, Nichtlineare Systeme, Heft 6), S. 277-293.
- Imdahl, Max [1988]: Farbe. Kunsttheoretische Reflexionen in Frankreich. München.
- Itten, Johannes [2001]: Kunst der Farbe. Leipzig.
- Kandinsky, Wassily / Marc, Franz (Hg.) [2002]: Der Blaue Reiter. München.
- Kandinsky, Wassily [1912]: Über das Geistige in der Kunst. München.

- Kästner, Erhart [1949]: Zeltbuch von Tumilad. Wiesbaden.
- Kirchhoff, Gustav R. [1860]: Über das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht. In: Pogg. Ann. d. Phys., 109, S. 275-301.
- Kirschmann, August [1917]: Das umgekehrte Spektrum und seine Komplementärverhältnisse. In: Physikalische Zeitschrift, Heft XVIII, S. 195-205.
- Kirschmann, August [1924]: Das umgekehrte Spektrum und die Spektralanalyse. In: Zeitschrift für Instrumentenkunde, Heft XLIV, S. 173-175.
- Kirschmann, August [1926]: Das umgekehrte Spektrum und seine Farben sowie seine Bedeutung für die optische Wissenschaft. In: Krüger, Felix (Hg.): Licht und Farbe. S. 411-442.
- Klee, Paul [1957]: Tagebücher 1898-1918. Köln.
- Klee, Paul [1990]: Das bildnerische Denken. Basel.
- Klee, Paul [1999]: Beiträge zur bildnerischen Formlehre. Bern.
- Klee, Paul [2007]: Unendliche Naturgeschichte. Basel.
- Klünker, Wolf-Ulrich [1989]: Geistesleben und anthropologische Wirklichkeit im 13. Jahrhundert. In: Die Drei, Beiheft 2, November 1989, S. 59-76.
- Klünker, Wolf-Ulrich / Sandkühler, Bruno [1988]: Menschliche Seele und kosmischer Geist. Siger von Brabant in der Auseinandersetzung mit Thomas von Aquin. Stuttgart.
- Krüger, Felix (Hg.) [1926]: Licht und Farbe. (=Neue Psychologische Studien, Band 2, 3. Heft). München.
- Kühl, Johannes [1988]: Zum Goetheschen Urphänomen der Farbentstehung und zu einem Zusammenhang mit Beugung und Brechung. In: Elemente der Naturwissenschaft, Heft 49, 1988/2, S. 85-95.
- Kühl, Johannes [2000]: Goethes Farbenlehre und die moderne Physik. In: Peter Heusser: Goethes Beitrag zur Erneuerung der Naturwissenschaften. Bern, S. 409-434.
- Kuhn, Thomas [1970]: The structure of scientific revolutions. In: Chicago University Press, Second Edition. Chicago.
- Kuhn, Thomas S. [1976]: Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. Frankfurt am Main.
- Lampert, Timm [2000]: Zur Wissenschaftsgeschichte der Farbenlehre. Bern.
- Land, Edwin H. [1959a]: Color vision and the natural image. Part I. (=Proceedings of the National Academy of Science 45). S. 115-129.
- Land, Edwin H. [1959b]: Experiments in color vision. In: Scientific American 200, No. 5, S. 84-99.
- Le Rider, Jacques [2002]: War die Klassik farbenfeindlich und die Romantik farbengläubig? Von Lessings Laokoon zu Goethes Farbenlehre und deren Nachwirkung. In: Walter Hinderer: Goethe und das Zeitalter der Romantik. Würzburg, S. 31-50.
- Lohne, Johannes A. [1965]: Isaac Newton: The rise of a scientist 1661-1671. (=Notes and records of the Royal Society of London 20), S. 125-139.

- Maier, Georg [1986]: Optik der Bilder. Dürnau.
- Matthaei, Rupprecht [1971]: Goethes Farbenlehre ausgewählt und erläutert von Rupprecht Matthaei. 1987, Ravensburg.
- Meyer-Abich, Klaus Michael [1983-84]: Selbstkenntnis, Freiheit und Ironie. Die Sprache der Natur bei Goethe. In: Scheidewege, Jg. 13, S. 278ff.
- Müller, Johannes Peter [1826]: Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig.
- Müller, Olaf [2007]: Goethes philosophisches Unbehagen beim Blick durchs Prisma. In: Glasauer et al (Hg.): Farben. Frankfurt / Main, S. 64-101.
- Newton, Isaac [1666]: Of Colours. In: Newton, Isaac : Idea Of a table booke. Labbook. Hg. von R. W. Newman. URL: <http://webapp1.dlib.indiana.edu/newton/mss/norm/ALCH00110>. Stand: 24.05.2010.
- Newton, Isaac [1671]: New Theory about Light and Colours. In: Philosophical Transactions of the Royal Society, 6. Jg., Heft 80, S. 3075-3087. (Online verfügbar: URL: <http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/6/69-80/3075.full.pdf>. Stand 24.05.2010.)
- Newton, Isaac [1672]: The new theory about light and colors. In: Thayer H.S.(Hg.) 1953: Newton's philosophy of nature. Selections from his writings. New York, S. 68-81.
- Newton, Isaac [1704a]: Opticks: or, a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light. 1. Auflage. London. (Online verfügbar: URL: [http://www3.babson.edu/archives/newton\\_collection/Opticks1704.pdf](http://www3.babson.edu/archives/newton_collection/Opticks1704.pdf). Stand: 24.05.2010)
- Newton, Isaac [1704b]: Opticks: or, a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light. In: Newton, Isaac 1983: Optik. Übersetzung von William Abendroth. Braunschweig/Wiesbaden
- Nussbaumer, Ingo [2005]: la couleur te regarde – die Farbe blickt dich an. Siebdruckbuch mit 12 Serigraphien und einem Text zur Dissipation der Farbe. Galerie und Edition Stalzer. Wien.
- Nussbaumer, Ingo [2008]: Zur Farbenlehre. Entdeckung der unordentlichen Spektren. Wien.
- Pöppel, Ernst [1985]: Die Grenzen des Bewußtseins. Über Wirklichkeit und Welterfahrung. Taschenbuch, 1987, München.
- Purkinje, Johannes Evangelista [1818]: Beiträge zur Kenntniss des Sehens in subjektiver Hinsicht. Prag.
- Purdy, Donald M. [1931]: Spectral hue as a function of intensity. In: The American Journal of Psychology, Volume 43, No. 4, October 1931, S. 541-559.
- Purdy, Donald M. [1937]: The Bezold-Brücke phenomenon and contours for constant hue. In: The American Journal of Psychology, Volume 49, No. 2 April 1937, S. 313-315.
- Rang, Bernhard [1990]: Husserls Phänomenologie der materiellen Natur. Frankfurt.
- Rang, Matthias [2009a]: Der Hellraum als Bedingung zur Invertierung spektraler Phänomene. Elemente der Naturwissenschaft 45. Jg., Heft 90, S. 46-79.
- Rang, Matthias [2009b]: Mehrfanchanwendung von Spiegelspaltblenden und Prismen - eine moderne Form von Newtons experimentum crucis. In: Nordmeier, V., Grötzebauch, H. (Hg.): Didaktik der Physik. Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG in Bochum 2009. Berlin.
- Rang, Matthias / Grebe-Ellis, Johannes [2009]: Komplementärspektren: Experimente mit einer Spiegel-Spalt-Blende. Mathematisch-Naturwissenschaftlicher Unterricht. 62. Jg. (4), S. 227-230.
- Rang, Matthias / Müller, Olaf [2010]: Newton in Grönland. Das umgestülpte experimentum crucis in der Streulichtkammer. In: philosophia naturalis 46, Heft 1, S. 61-114.
- Rifkin, Jeremy [2010]: Die empathische Zivilisation. Wege zu einem globalen Bewusstsein. Frankfurt / New York. Erschien zuerst 2009 in den USA.
- Rittelmeyer, Friedrich [1929]: Meditation. Zwölf Briefe über Selbsterziehung. 14. Auflage, 1997. Stuttgart.
- Rothhaupt, Josef. G. [1996]: Farbthemen in Wittgensteins Gesamtnachlaß, Philologisch-philosophische Untersuchungen im Längsschnitt und in Querschnitten. Weinheim.
- Schad, Wolfgang [1983]: Einleitung. In: Würde der Dinge, Freiheit des Menschen, Goethe-Texte. Stuttgart
- Schelling, Friedrich Wilhelm Joseph [1799]: Erster Entwurf eines Systems der Naturphilosophie. Jena / Leipzig.
- Schiller, Friedrich [1780]: Versuch über den Zusammenhang der thierischen Natur des Menschen mit seiner geistigen. Stuttgart.
- Schiller, Friedrich [1795]: Über die ästhetische Erziehung des Menschen. Sechszwanzigster Brief. 3. Auflage. 2004. Stuttgart.
- Schiller, Friedrich [1803]: Über den Gebrauch des Chors in der Tragödie. In: <http://wissen-im-netz.info/literatur/schiller/messina/chor.htm> Stand: 22.04.2010
- Schlüter, Martin [1991]: Goethes und Ritters überzeitlicher Beitrag zur naturwissenschaftlichen Grundlagendiskussion, Dissertation, Frankfurt.
- Schöne, Albrecht [1979]: Augursymbolik. Goethe, auf dem Harz im Dezember 1777. Goethe-Jahrbuch, Band 96. Weimar.
- Schöne, Albrecht [1987]: Goethes Farbentheologie. München.
- Schopenhauer, Arthur [1854]: Ueber das Sehn und die Farben. Leipzig.
- Schopenhauer, Arthur [1978]: Gesammelte Briefe. Bonn.
- Schrödinger, Erwin [1920]: Grundlinien einer Theorie der Farbenmetrik im Tagessehen. In: Annalen der Physik, 4. Folge, Band 63, S. 397-456, 481-520.
- Schrödinger, Erwin [2001]: Was ist Leben? Die lebende Zelle mit den Augen des Physikers betrachtet. München / Zürich.
- Schulte, Joachim [1984]: Chor und Gesetz. Zur 'morphologischen Methode' bei Goethe und Wittgenstein. In: Grazer philosophische Studien, S. 1-32.
- Sällström, Pehr [2010]: Monochromatische Schattenstrahlen. Ein Experimentalfilm zur Rehabilitation der Dunkelheit, Dreisprachige DVD. Kassel.
- Siegel, Carl [1913]: Geschichte der deutschen Naturphilosophie. Leipzig.

- Steiner, Rudolf [1887]: Einleitungen zu Goethes naturwissenschaftlichen Schriften -Zugleich eine Grundlegung der Geisteswissenschaft (Anthroposophie) In: Steiner, Rudolf [1883-1897]: Goethes Naturwissenschaftliche Schriften. Fotomechanischer Nachdruck der Erstauflage in «Deutsche National-Literatur», 1975. Dornach.
- Steiner, Rudolf [1886]: Grundlinien einer Erkenntnistheorie der Goetheschen Weltanschauung. In: Steiner, Rudolf 1979: Gesamtausgabe, Band GA 2. Dornach.
- Steiner, Rudolf [1897]: Goethes Weltanschauung. In: Steiner, Rudolf 1963: Gesamtausgabe. Band GA 6. Dornach.
- Steiner, Rudolf [1902]: Das Christentum als mystische Tatsache und die Mysterien des Altertums. In: Steiner, Rudolf 1989: Gesamtausgabe, Band GA 8. Dornach.
- Steiner, Rudolf [1905]: Wie erlangt man Erkenntnisse der höheren Welten. In: Steiner, Rudolf 1982: Gesamtausgabe, Band GA 10. Dornach.
- Steiner, Rudolf [1904-05]: Ursprung und Ziel des Menschen. In: Rudolf Steiner-Nachlassverwaltung 1981: Gesamtausgabe, Band GA 53. Dornach.
- Steiner, Rudolf [1912-13]: Ergebnisse der Geistesforschung. In: Rudolf Steiner-Nachlassverwaltung 1982: Gesamtausgabe, Band GA 62. Dornach.
- Steiner, Rudolf [1915]: Kunst im Lichte der Mysterienweisheit. Vortrag vom 1. Januar 1915. In: Rudolf Steiner-Nachlassverwaltung 1990: Gesamtausgabe, Band GA 275. Dornach.
- Steiner, Rudolf [1916]: Das Rätsel des Menschen. Vortrag vom 15. August 1916. In: Steiner, Rudolf 1964: Gesamtausgabe, Kosmische und menschliche Geschichte, Band GA 170. Dornach S. 143-166.
- Steiner, Rudolf [1917]: Von Seelenrätseln. In: Steiner, Rudolf 1976: Gesamtausgabe, Band GA 21. Dornach.
- Steiner, Rudolf [1918]: Die soziale Grundforderung unserer Zeit. Vortrag vom 12. Dezember 1918. In: Rudolf Steiner-Nachlassverwaltung 1990: Gesamtausgabe, Band GA 186. Dornach.
- Steiner, Rudolf [1920a]: Die Philosophie des Thomas von Aquino. In: Rudolf Steiner-Nachlassverwaltung 1972: Gesamtausgabe Band GA 74. Dornach.
- Steiner, Rudolf [1920b]: Grenzen der Naturerkenntnis. Vorträge vom 30. September, 1. Oktober 1920 vormittags und 3. Oktober 1920. In: Rudolf Steiner-Nachlassverwaltung 1969: Gesamtausgabe. Band GA 322. Dornach.
- Steiner, Rudolf [1894-1925]: Farbenerkenntnis. Ergänzungen zu dem Band: Das Wesen der Farben. In: Rudolf Steiner-Nachlassverwaltung 1990: Gesamtausgabe, Band GA 291a. Dornach.
- Steiner, Rudolf [1904-1924]: Seelenübungen. In: Rudolf Steiner-Nachlassverwaltung 2001: Gesamtausgabe, Band GA 267. Dornach.
- Steiner, Rudolf [1921]: Das Wesen der Farben. Vortrag vom 7. Mai 1921. In: Rudolf Steiner-Nachlassverwaltung 1973: Gesamtausgabe, Band GA 291. Dornach.
- Steiner, Rudolf [1924a]: Vorträge und Kurse über christlich-religiöses Wirken. Apokalypse und Priesterwirken. Vortrag vom 21. September 1924. In: Rudolf Steiner-Nachlassverwaltung 2001: Gesamtausgabe, Band GA 346. Dornach.

- Steiner, Rudolf [1924b]: Esoterische Betrachtungen karmischer Zusammenhänge. Vortrag vom 1. Juli 1924. In: Rudolf Steiner-Nachlassverwaltung 1971: Esoterische Betrachtungen karmischer Zusammenhänge. 12 Vorträge. Band 1. Dornach.
- Takahashi, Yoshito [2007]: Goethes Farbenlehre und die Identitätsphilosophie. In: Goethe Jahrbuch, Band 124, S. 105-114.
- Thayer, H.S. (Hg.) [1953]: Newton's philosophy of nature. Selections from his writings. New York.
- Thomas von Aquin [1225-1274]: De unitate intellectus contra Averroistas. In: Thomas von Aquin 1987: Über die Einheit des Geistes. Übersetzung von Wolf-Ulrich Klünker. Stuttgart.
- Turrell, James [2001]: Gespräch mit Gerhard Mack. In: Köppel, Roger Weltwoche, Heft 40.
- Veenman, Kees [2010]: Metallfarblichttherapie. Zur Forschung und Entwicklung einer neuen Therapie auf anthroposophischer Grundlage. In: Altmaier, Marianne: Der Merkurstab. Jg. 62, Heft 6, S. 594-604.
- Vendler, Zeno [1995]: Goethe, Wittgenstein and the Essence of Color. In: The Monist, 78, S. 391-410.
- Weizsäcker, Carl Friedrich von [1971]: Die Einheit der Natur. München.
- Weizsäcker, Carl Friedrich von [1991]: Goethes Farbentheologie – heute gesehen, In: Nachrichten der Akademie der Wissenschaften in Göttingen, 1. Philologisch-Historische Klasse, 365-373.
- Wilson, Michael H. / Brocklebank, R. W. [1960]: Two-colour projection phenomena. In: Journal of Photographic Science Volume 8, S. 141-150.
- Wittgenstein, Ludwig [1953]: Philosophische Untersuchungen. Frankfurt / Main.
- Wittgenstein, Ludwig [1977]: Vermischte Bemerkungen. Frankfurt / Main.
- Wittgenstein, Ludwig [1984]: Bemerkungen über die Farben. Frankfurt / Main.
- Zajonc, Arthur [1994]: Die gemeinsame Geschichte von Licht und Bewusstsein. Reinbek bei Hamburg.